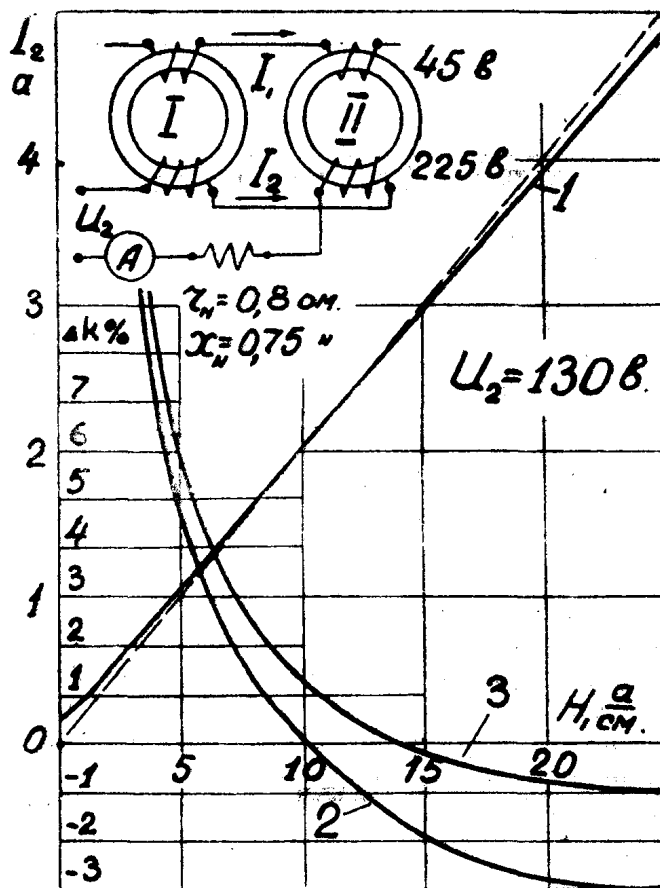


## УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С СЕРДЕЧНИКАМИ ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

К. К. РЯЗАНЦЕВ

Измерительный трансформатор постоянного тока с сердечниками из электротехнической стали, работающий без выпрямления переменного тока,



Фиг. 1

имеет погрешность в токе различной величины и знака в зависимости от значения слагающей напряженности поля в сердечниках

$$H_1 = \frac{I_1 w_1}{l_{cp}}, \quad (1)$$

где  $I_1$  — величина постоянного („первичного“) тока,

$w_1$  — число витков обмотки постоянного тока,

$l_{cp}$  — длина средней магнитной линии сердечника.

На фиг. 1 даны кривые 1 и 2, выражающие зависимость от  $H_1$  действующего значения вторичного тока  $I_2$  и погрешности  $\Delta k\%$  трансформатора

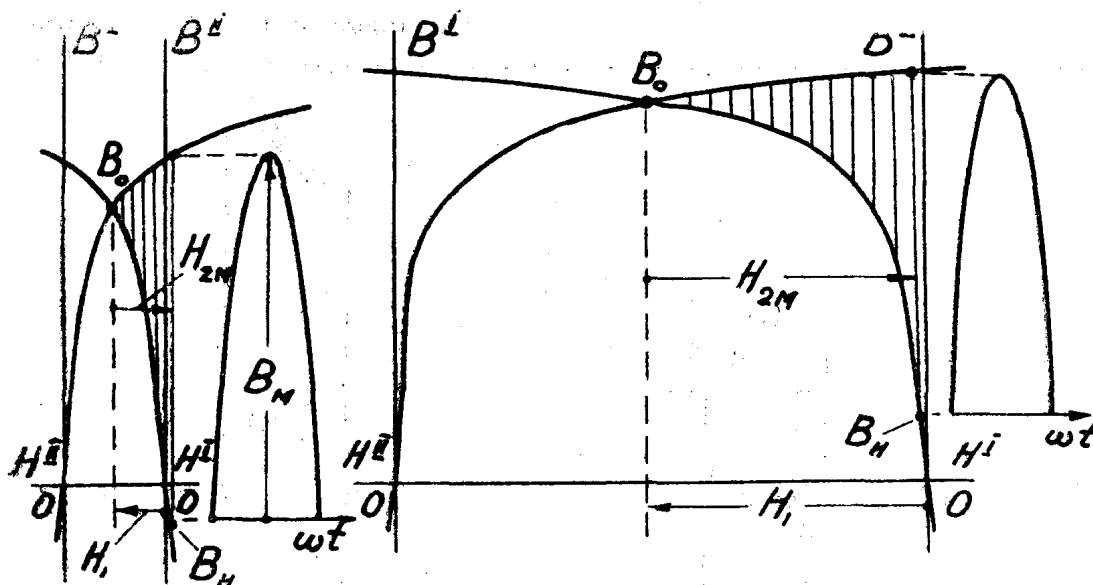
постоянного тока, выполненного из деталей измерительного трансформатора переменного тока типа Т. П. Погрешность подсчитана по известному выражению

$$\Delta k \% = \frac{k_{ном} I_2 - I_1}{I_1} 100. \quad (2)$$

Здесь  $k_{ном} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{225}{45} = 5$  — номинальный коэффициент трансформации,

$\omega_2$  — число витков обмотки переменного тока.

Для сравнения там же проведена пунктирная линия, дающая связь между первичным и вторичным токами идеального трансформатора без погрешности, имеющего такой же коэффициент трансформации. Начальная часть кривой 1 располагается выше прямой, затем они пересекаются, после чего кривая проходит ниже, изгибаясь в сторону оси  $H_1$ .



Фиг. 2

Причиной такого хода кривой является следующее. При небольших значениях  $H_1$  внешнее напряжение  $u_2$ , приложенное к вторичной цепи трансформатора, уравнивается в основном противо- э.д.с.  $e_2$ , называемой во вторичных обмотках трансформатора. Если пренебречь активным сопротивлением обмоток переменного тока и нагрузкой вторичной цепи, то для уравнивания  $u_2$  разность мгновенных значений индукций в обоих сердечниках должна изменяться по закону синуса:

$$B^I - B^{II} = B_m \sin \omega t, \quad (3)$$

причем

$$B_m = \frac{U_{2м}}{\omega \cdot \omega_2 S}. \quad (4)$$

Здесь  $B_m$  — амплитуда разности индукций,

$U_{2м}$  — амплитуда напряжения,

$\omega$  — угловая частота,

$S$  — сечение стали сердечника ( $20 \text{ см}^2$ ).

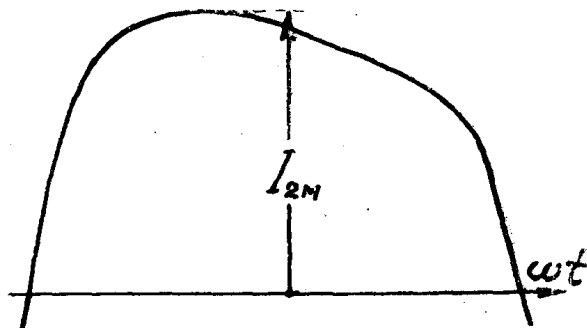
На фиг. 2 показано графическое определение максимального значения переменной слагающей напряженности поля сердечника

$$H_{2м} = I_{2м} \frac{\omega_2}{l_{ср}},$$

основанное на использовании выражения (3). Здесь  $I_{2м}$  — наибольшее мгновенное значение вторичного тока (фиг. 3).

Для удобства построения характеристика намагничивания второго дросселя трансформатора повернута на  $180^\circ$ . Обе характеристики совмещены точками  $B_0$ , соответствующими  $H_1$ .

Слева фиг. 2 осуществлено построение при относительно малом значении  $H_1$ , справа — при большом. В первом случае минимум индукции  $B_m$  заходит далеко в область отрицательных значений и  $H_{2м} > H_1$ , что является причиной погрешности положительного знака. Действующее значение вторичного тока  $I_2$  оказывается больше первичного тока  $I_1$ , деленного на номинальный коэффициент трансформации.



Фиг. 3

Такое соотношение между токами существует не во всех случаях. Когда точка  $B_m$  спускается ниже оси абсцисс, так как кривая изменения вторичного тока трапециoidalна (фиг. 3), вследствие чего действующее значение тока всегда меньше максимального. Однако при малых  $H_1$

(до  $10 \frac{a}{см}$  на фиг. 1) имеется налицо положительная погрешность. При больших  $H_1$  точка  $B_m$ , как это видно из фиг. 2, остается в положительной области и тогда погрешность явно будет иметь отрицательный знак, так как  $H_{2м} < H_1$ .

Кроме того в этом случае в связи с ростом вторичного тока увеличивается падение напряжения на активном сопротивлении обмоток и нагрузке, что приводит к уменьшению слагающей внешнего напряжения, которую должна уравновесить э.д.с.  $e_2$ , индуцируемая в обмотках переменного тока. Разность индукций в сердечниках теряет синусоидальный характер и уменьшается, вследствие чего еще сильнее нарушается пропорциональность между постоянным и переменным токами. Поэтому величина вторичного тока, найденная по характеристикам намагничивания, исходя из синусоидальности изменения разности индукций, будет завышенной, но даже и в этом случае по фиг. 2 явно видно относительное снижение как мгновенных, так и действующих значений переменного тока при росте  $I_1$  и, следовательно,  $H_1$ . Таким образом, при небольших напряжениях поля погрешность трансформатора в токе будет иметь положительный знак, а в области средних и больших значений  $H_1$  — отрицательный.

Для получения наименьшей погрешности, амплитуда синусоиды  $B_m$  должна быть выбрана такой, чтобы минимальное значение индукции  $B_m$  во всем диапазоне изменений первичного тока колебалось на наиболее крутом начальном участке характеристики намагничивания.

Выбор амплитуды  $B_m$  по указанным выше соображениям обеспечивает также наименьшую чувствительность трансформатора к колебаниям напряжения сети переменного тока, что можно проследить по фиг. 2. Действительно, если напряжение изменилось, то одновременно меняется в такой же пропорции и амплитуда разности индукций, для создания которой во вторичной цепи должен протекать ток  $I_{2м}$ . Последний будет мало отличаться от тока, имеющего место при нормальном напряжении, если точка  $B_m$  не выйдет с начального крутого участка характеристики. При небольшом же отклонении от нормы максимального значения вторичного тока будет мало изменено действующее значение того же тока, что и требуется для уменьшения погрешности.

Для выбора амплитуды индукции  $B_m$ , необходимо иметь в своем распоряжении характеристику намагничивания стали сердечников трансформатора и построить семейство кривых (фиг. 4)

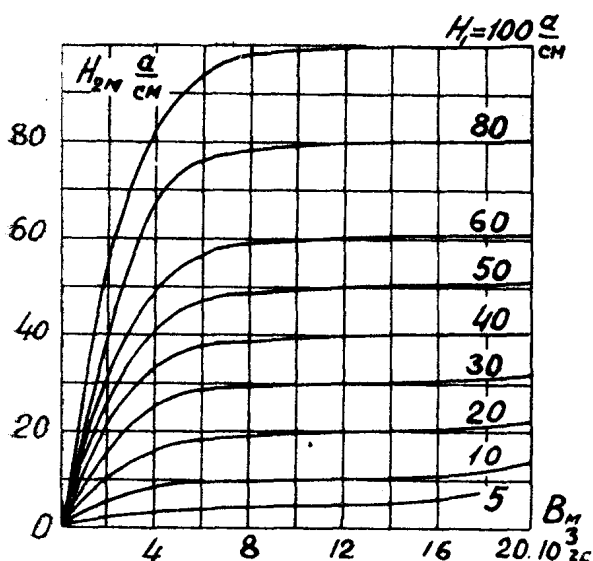
$$H_{2m} = f(B_m) \text{ при } H_1 = \text{const.}$$

Для достижения устойчивости значений вторичного тока при изменениях напряжения  $U_2$  и постоянного тока величина  $B_m$  должна колебаться в границах верхних слабо наклонных участков кривых фиг. 4. Например, если ориентироваться на изменение  $H_1$  от 2,5 до  $50 \frac{a}{cm}$ , то для данного сорта стали следует выбрать

$$B_m = 12000 \div 14000 \text{ гс.}$$

Выбранное значение  $B_m$  требует последующего корректирования, которое осуществляется путем небольшого изменения числа витков вторичных обмоток после испытания готового трансформатора, имеющего во вторичной цепи номинальную нагрузку.

Величина погрешности зависит также от отдачи энергии из цепи переменного тока в цепь постоянного тока. Так как вторичные обмотки включены встречно, то энергия отдается только за счет э.д.с. четных гармоник, наведенных в первичных обмотках. Однако в трансформаторе нормального исполнения, аналогичного по конструкции одновитковому трансформатору переменного тока, эти э.д.с. невелики и не могут создать заметных токов. При проведении же испытаний опытного образца трансформатора в цепь постоянного тока для заглушения токов четных гармоник включались дроссели с сердечниками большого сечения, не насыщавшиеся при протекании измеряемых токов.



Фиг. 4

Таким образом, на величину погрешности трансформатора оказывают влияние следующие факторы:

- 1) отклонение характеристики намагничивания стали сердечников от идеальной прямоугольной характеристики;
- 2) правильность выбора параметров трансформатора;
- 3) величина нагрузки во вторичной цепи трансформатора;
- 4) колебание напряжения в сети переменного тока;
- 5) отдача энергии из цепи переменного тока в цепь постоянного тока.

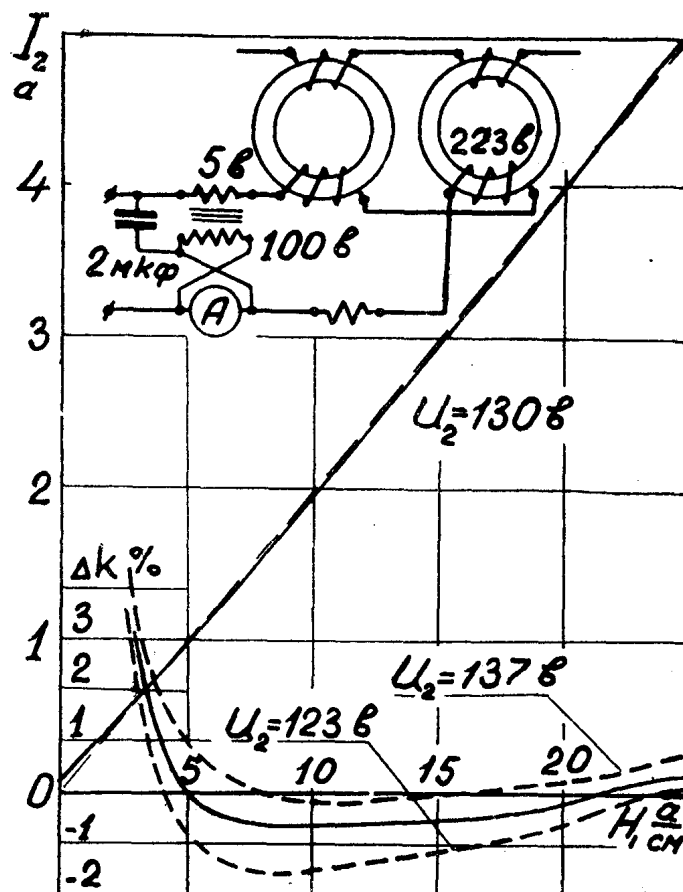
Как было это указано выше, после испытания готового трансформатора необходимо изменить число витков вторичных обмоток так, чтобы получить наиболее благоприятное распределение погрешностей вдоль шкалы измерительного прибора.

На фиг. 1 показана кривая 3, выражающая зависимость  $\Delta k\%$  после уменьшения  $w_2$  с 225 до 221. Последнее привело к увеличению погрешности при малых  $H_1$  и снижению ее в конце шкалы. Кроме того, точка с нулевой погрешностью сдвинулась вправо. Очевидно, что при увеличении числа витков эта точка сместится влево. Но одно это мероприятие не является достаточным, так как оно позволяет повысить точность лишь в узких пределах шкалы.

Дальнейшее улучшение можно было бы достичь градуировкой шкалы амперметра, что, однако, будет вызывать затруднения при его смене. Поэтому приходится вводить в схему трансформатора дополнительные элементы, чтобы иметь возможность использовать стандартный амперметр электромагнитной системы без какой-либо переделки и определять величину постоянного тока путем умножения его показаний на номинальный коэффициент трансформации.

Ниже описывается способ компенсации погрешности обоих знаков, который состоит в том, что на вторичный ток трансформатора, протекающий через амперметр, накладываются два дополнительных тока взаимно противоположного направления.

На фиг. 5 показана схема соединений измерительного трансформатора постоянного тока, в которую включены емкость в  $2 \text{ мкф}$  и вспомогательный трансформатор с соотношением чисел витков первичной и вторичной обмоток  $5:100$ . Сердечник вспомогательного трансформатора взят от старого трансформатора тока катушечного типа ( $S = 12,3 \text{ см}^2$ ,  $l_{cp} = 47 \text{ см}$ ).



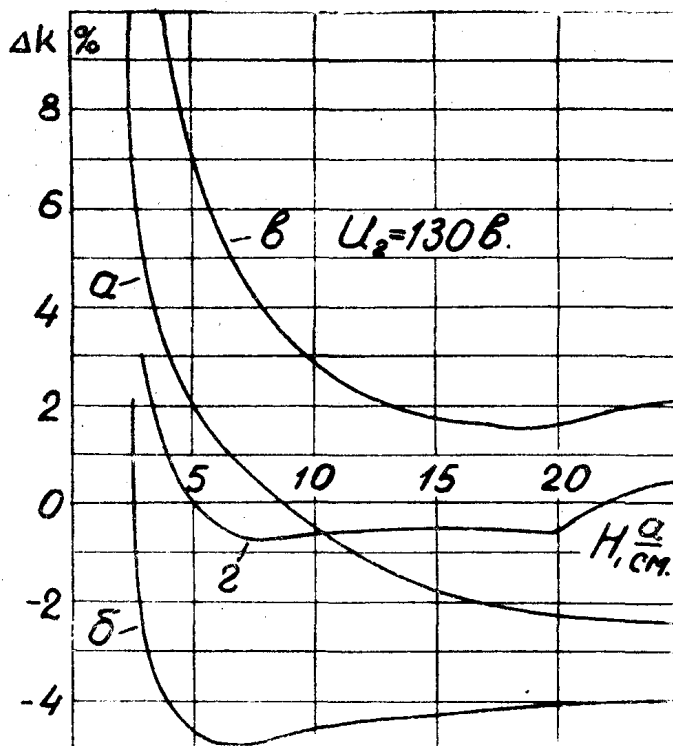
Фиг. 5

Кроме того на фиг. 5 изображена кривая  $I_2 = f(I_1)$  при расчетном напряжении сети переменного тока  $130 \text{ В}$ , а также кривые изменения погрешности  $\Delta k\%$  при расчетном напряжении (средняя кривая) и отклонении от него на  $\pm 5\%$  (пунктирные кривые), построенные по данным испытаний. Если сравнить среднюю кривую  $\Delta k\%$  с кривыми № 2 и 3 фиг. 1, то можно отметить значительное улучшение точности измерений как в начале шкалы, так и в конце ее.

Роль емкости состоит в том, что с ее помощью через амперметр пропускается ток, сдвинутый по фазе относительно вторичного тока трансфор-

матора приблизительно на  $180^\circ$ , и это приводит к уменьшению показаний амперметра в начале шкалы. Емкость, если она имеет необходимую величину, выполняет и вторую функцию, заключающуюся в компенсации изменений вторичного тока при колебаниях напряжения сети переменного тока (подробнее см. статью А. Г. Никифорова „Измерительный трансформатор постоянного тока“ ВЭП, 1939, № 10—11).

Вспомогательный же трансформатор служит для наложения на вторичный ток второго дополнительного тока, близкого к совпадению с ним по фазе и пропорционального ему по величине. В результате такого комби-



Фиг. 6

нированного воздействия на амперметр происходит отмеченное повышение точности.

Для выяснения роли каждого элемента схемы на фиг. 6 даны следующие кривые погрешности в токе:

- а — трансформатора постоянного тока ( $\omega_2 = 223$ ) без емкости и без вспомогательного трансформатора;
- б — то же с присоединенной емкостью в 2 мкф;
- в — то же с включенным вспомогательным трансформатором;
- г — то же с емкостью и вспомогательным трансформатором.

Трансформатор постоянного тока, на котором осуществлялась проверка, имел довольно высокую чувствительность к колебаниям вспомогательного напряжения  $U_2$  (см. пунктирные кривые  $\Delta k\%$  на фиг. 5), снижение которой можно достичь увеличением емкости при соответствующем изменении чисел витков вторичных обмоток дросселей и коэффициента трансформации вспомогательного трансформатора.

В заключение следует отметить, что, судя по характеру кривой г, фиг. 6, можно предполагать, что и при повышении напряженности поля  $H_1$  свыше  $25 \frac{a}{см}$  рассмотренные выше мероприятия дали бы улучшение точности измерений.